



บทที่ 4

ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์เบื้องต้น

บทนำ

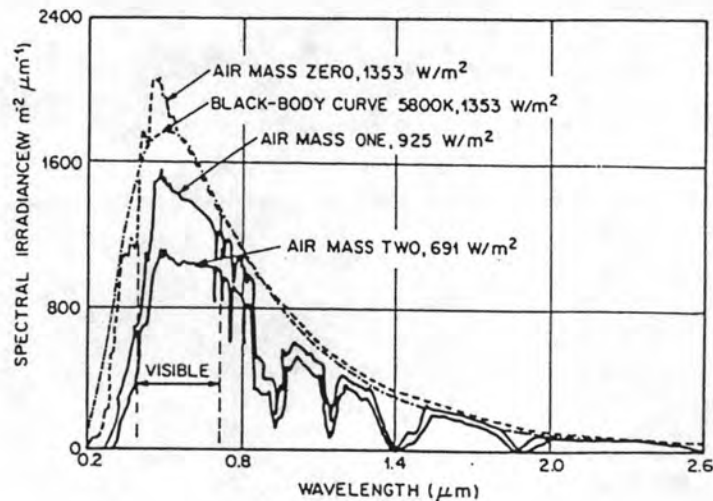
ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวันมากขึ้น ตัวอย่างเช่น ในเครื่องคำนวณ เครื่องอำนวยความสะดวกต่างๆ และได้มีการพัฒนาให้เป็นแหล่งพลังงานสำรอง เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมดและปราศจากมลพิษ จึงจะสามารถนำมาทดแทนพลังงานที่ได้จากน้ำมันและถ่านหิน ซึ่งนับวันจะร่อยหรอลง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ให้มีสมบัติการแปลงพลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น และให้กำลังไฟฟ้าที่คงที่ในราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ซึ่งแนวทางในการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ได้มีการคาดหวังว่าจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นแผงแบน โดยโครงสร้างเป็นลักษณะของฟิล์มบาง, มีราคาถูก, มีความเสถียรในการแปลงพลังงานไฟฟ้า และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ซึ่งคุณสมบัติบางประการนั้น สามารถทำได้ในขั้นทดลองแล้ว และได้มีการขยายไปสู่การผลิตในขั้นใช้งานจริง อีกทั้งยังได้นำเอาสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ มาประดิษฐ์เป็นตัวเซลล์ โดยมีโครงสร้างแบบต่างๆ กันไป เช่น เป็นแบบผลึกเดี่ยว แบบฟิล์มบาง แบบผลึกซ้อน เพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น^{2.3}

การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์^{9.15}

พลังงานซึ่งแผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์นั้น จะมาจากการเกิดปฏิกิริยาการรวมนิวเคลียส (nuclear fusion reaction) ซึ่งทุกๆวินาทีจะมีการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจน (H_2) จำนวน 6×10^{11} กิโลกรัม ไปเป็นฮีเลียม (He) โดยจะมีมวลสูญเสียสุทธิประมาณ 4×10^3 กิโลกรัม ซึ่งสามารถคำนวณกลับไปเป็นพลังงานโดยอาศัยความสัมพันธ์ของไอสไตน์ คือ $E = mc^2$ ได้ค่าประมาณ 4×10^{20} จูล ซึ่งพลังงานนี้ได้ถูกปลดปล่อยออกมาในรูปแบบของการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านของอุลตราไวโอเล็ตไปจนถึงอินฟราเรดและสเปกตรัมของคลื่นวิทยุ (0.2 ถึง $3 \mu m$) จากการที่ดวงอาทิตย์มีมวลประมาณ 2×10^{30} กิโลกรัม ซึ่งถ้าคำนวณจากอัตราการแผ่รังสีนี้ จะพบว่า ดวงอาทิตย์นั้นสามารถจะให้พลังงานที่คงที่ไปได้มากถึงกว่า 10 ล้านปี

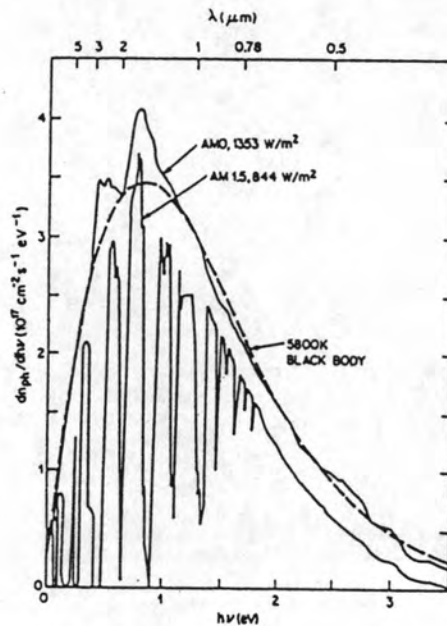
ความเข้มของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ในอวกาศที่ระยะเฉลี่ยจากโลกถึงดวงอาทิตย์นั้น เรียกว่า ค่าคงที่สุริยะ (solar constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1353 W/m^2 โดยปกติชั้นบรรยากาศที่หุ้มห่อโลกไว้จะเป็นตัวลดทอนแสงอาทิตย์ที่จะส่องลงมาถึงพื้นโลก โดยที่ส่วนใหญ่พวกไอน้ำจะเป็นตัวดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ชั้นของโอโซน (ozone) จะดูดกลืนรังสีอุลตราไวโอเล็ต และจะถูกทำให้กระเจิง (scattering) โดยผงฝุ่นและอนุภาคต่างๆ ที่ล่องลอยอยู่ในอากาศ ค่ามุมเบนที่ชั้นบรรยากาศกระทำต่อทิศทางของแสงที่พุ่งมาจากดวงอาทิตย์สู่พื้นโลก ให้นิยามว่า มวลอากาศ (air mass) หรือคำนวณจากค่า $\sec \theta$ เมื่อ θ เป็นมุมระหว่างตำแหน่งของดวงอาทิตย์ กับจุดเซนิท (zenith) หรือจุดที่อยู่เหนือกลางศีรษะ

ในรูปที่ 4.1 แสดงถึงกราฟของการแผ่รังสีสเปกตรัมสุริยะ (กำลังต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยความยาวคลื่น) เส้นโค้งบนสุดแสดงถึงค่าสเปกตรัมสุริยะภายนอกบรรยากาศโลก โดยนิยามเท่ากับ มวลอากาศศูนย์ (AM0) ซึ่งจะประมาณเท่ากับการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิ 5800 K วัตถุที่อยู่ภายนอกโลก เช่น ดาวเทียม อวกาศยาน จะได้รับค่ามวลอากาศศูนย์ทั้งหมด ค่ามวลอากาศ (AM1) จะมีค่าเท่ากับค่าสเปกตรัมสุริยะที่พื้นโลกภายใต้ชั้นบรรยากาศ ที่มุมเซนิท โดยจะมีความเข้มประมาณ 925 W/m^2 และที่มุม $\theta = 60^\circ$ จะนิยามเป็นค่ามวลอากาศ 2 (AM2) ซึ่งมีความเข้มเท่ากับ 691 W/m^2 .



รูปที่ 4.1 แสดงการแผ่รังสีสเปกตรัมสุริยะ ที่ค่ามวลอากาศต่างๆ

ค่ามวลอากาศ 1.5 (AM1.5) ซึ่งประมาณค่าความเข้มที่มุม 45° จากมุมเซนิท เป็นค่าความเข้มเฉลี่ยที่ให้พลังงานแสงได้ดีสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจำนวนของโฟตอน (photons) ในหน่วยของพลังงานต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่า AM1.5 แสดงไว้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมสุริยะเป็นฟังก์ชันกับพลังงานโฟตอนที่ AM0 และ AM1.5

โดยการแปลงจากค่าความยาวคลื่นไปเป็นพลังงานโฟตอนนั้น ทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\lambda = c/v = 1.24/h\nu \text{ (eV)} \quad [\mu\text{m}] \quad (4.1)$$

ซึ่งจะได้ว่า ที่ AM1.5 จะมีความเข้มประมาณ 844 W/m^2

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเชิงอุดมคติ ^{9,13,15.}

ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบพื้นฐาน ยกตัวอย่างเช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น เมื่อมีสเปกตรัมแสงมากระทบกับตัวเซลล์ พบว่า ถ้าโฟตอนที่มากกระทบมีพลังงานไม่ถึงค่าของช่องว่างแถบพลังงาน, E_g , จะไม่ทำให้เกิดกระบวนการใดๆขึ้น แต่ถ้าโฟตอน

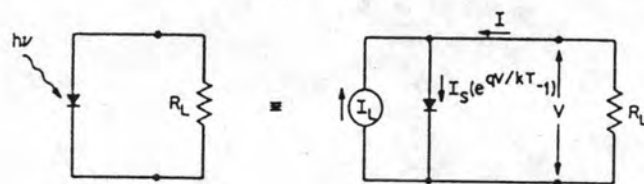
ที่มากกระทบนั้นมีพลังงานมากกว่าค่า E_g จะทำให้เกิดการผลิตคู่อิเล็กตรอน - โฮลขึ้น และส่งออก
ไปเป็นผลผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์ ส่วนพลังงานที่มากเกินความจำเป็นจะสูญเสียไปในรูปของ
พลังงานความร้อน

ถ้าสมมติให้เซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะในเชิงอุดมคติของความสัมพันธ์ กระแส -
ความต่างศักย์ พบว่า เราจะสามารถเขียนวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังรูปที่ 4.3
โดยที่มีลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสคงที่ ต่อขนานอยู่กับไดโอดแบบอุดมคติซึ่งเป็นตัวแทนของ
รอยต่อแบบพี-เอ็น จากรูป แหล่งกำเนิดกระแส I_s จะเป็นผลของการที่เซลล์แสงอาทิตย์มีแสง
มาตกกระทบที่บริเวณรอยต่อ ถ้าให้ I_s คือค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอด และ R_L เป็น
ความต้านทานที่พ่วงต่ออยู่ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - ความต่างศักย์ สามารถเขียนได้
ดังสมการ

$$I = I_s (e^{qV/kT} - 1) - I_L \tag{4.2}$$

และ

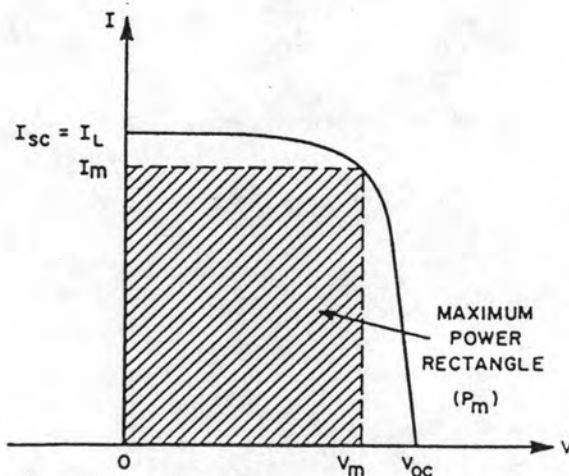
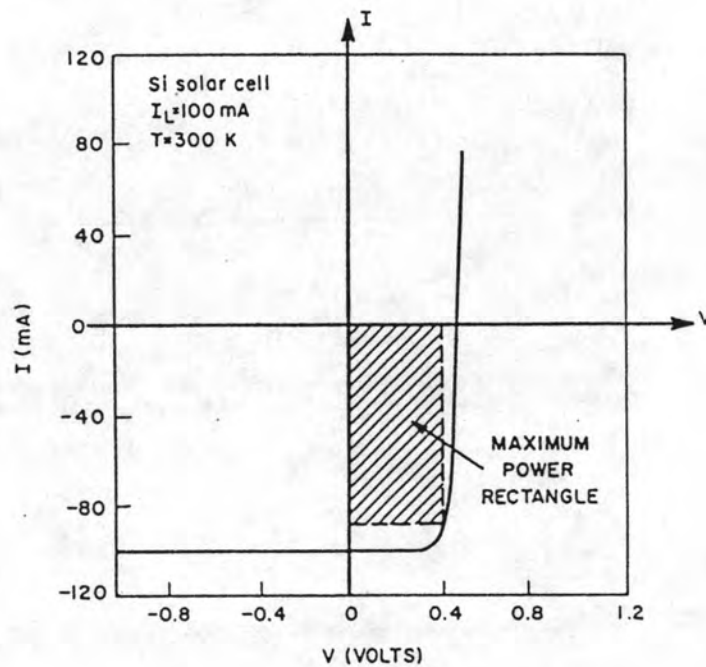
$$J_s = I_s / A = qN_c N_v \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) e^{-E_g/kT} \tag{4.3}$$



รูปที่ 4.3 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติ

โดยในสมการ (4.3) นี้ A คือพื้นที่ของตัวเซลล์ โดยจากสมการที่ (4.2)
สามารถที่จะเขียนกราฟความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ได้ดังรูปที่ 4.4 (ก.) ซึ่งเป็นกราฟ
ในกรณีที่มีแสงตกกระทบกับตัวเซลล์ เนื่องจากกราฟที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างไปทางบริเวณ
ควอเทอร์นที่ 4 ดังนั้นจึงสามารถจะหาค่าของกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยพิจารณาจาก

ช่วงประมาณ 80 % ของผลคูณระหว่าง I_{sc} กับ V_{oc} เมื่อ I_{sc} คือค่ากระแสเปิดวงจร และ V_{oc} คือค่าความต่างศักย์เปิดวงจร ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในบริเวณที่แลงเงาในรูป 4.4 แสดงถึงค่ากำลัง สูงสุดแบบสี่เหลี่ยม จากความสัมพันธ์ของกระแส - ความต่างศักย์ ทำให้สามารถเขียนกราฟได้ ดังรูปที่ 4.4 (ข.) ซึ่งเป็นการกลับด้านแกนของความต่างศักย์ และทำให้สามารถนิยามตัวแปร I_m และ V_m จากกราฟ ส่วนผลคูณของทั้งสองตัวแปรนี้ก็คือค่ากำลังสูงสุด ,
 $(P_m = I_m V_m)$



รูปที่ 4.4 (ก) แสดงความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ภายใต้สภาพ
 ฉายแสง โดยที่รูป (ข) เป็นส่วนกลับ

เพราะฉะนั้น จากสมการที่ 4.2 สามารถจะเขียนค่าของความต่างศักย์เปิดวงจร ($I = 0$) ได้เป็น

$$V_{\infty} = kT/q \ln [I_L/q + 1/I_S] = kT/q \ln (I_L/I_S) \quad (4.4)$$

เมื่อพิจารณาระบบว่า จากค่า I_L ค่าของความต่างศักย์เปิดวงจรจะเพิ่มขึ้นแบบฟังก์ชันล็อก กับการลดลงของค่ากระแสอิ่มตัว I_S ดังนั้น กำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ส่งออกมา คือ

$$P = IV = I_S V (e^{qV/kT} - 1) - I_L V \quad (4.5)$$

ซึ่งในกรณีที่เป็นการกำลังสูงสุด จะได้ว่า $dP/dV = 0$ ดังนั้น

$$I_m = I_S \beta V_m e^{\beta V_m} \sim I_L \{1 - 1/\beta V_m\} \quad (4.6)$$

และ

$$V_m = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I_L/I_S + 1}{1 + \beta V_m} \right) \sim V_{\infty} - (1/\beta) \ln(1 - \beta V_m) \quad (4.7)$$

เมื่อ $\beta = q/kT$ เพราะฉะนั้น ค่ากำลังสูงสุด P_m เขียนได้ว่า

$$P_m = I_m V_m \sim I_L [V_{\infty} - (1/\beta) \ln(1 - \beta V_m) - 1/\beta] = I_L (E_m / q) \quad (4.8)$$

ซึ่ง

$$E_m = q [V_{\infty} - (1/\beta) \ln(1 - \beta V_m) - 1/\beta] \quad (4.9)$$

โดยที่พลังงาน E_m นี้จะมีความสัมพันธ์กันกับค่าพลังงานต่อโฟตอนที่ส่งต่อออกไปใช้นอกเซลล์ที่ค่ากำลังสูงสุด

ในสารกึ่งตัวนำหนึ่งๆ ค่าของความหนาแน่นอิ่มตัว, J_S สามารถคำนวณหาได้จาก สมการที่ (4.3) และภายใต้สภาพฉายแสงขนาด AM1.5 จะสามารถหาค่าของความหนาแน่นกระแสเปิดวงจรได้จากรูปที่ 4.2 โดย

$$J_L(E_g) = q \int_{hv/E_g}^{\infty} (dn_{ph} / dh\nu) d(h\nu) \quad (4.10)$$

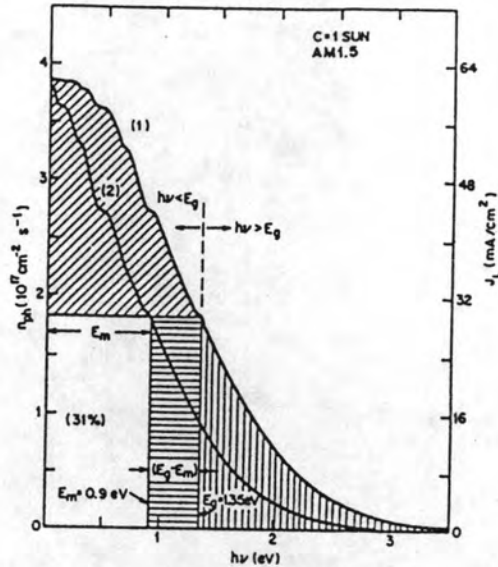
ซึ่งผลของสมการที่ (4.10) นี้ แสดงได้ดั่งกราฟเส้นที่ 1 ในรูปที่ 4.5 ซึ่งถ้าทราบค่าของ J_s และ J_L ก็จะสามารถคำนวณหาค่าของ E_m ได้จากการหาผลสำเร็จเชิงตัวเลขจากสมการที่ (4.4), (4.7), และ (4.9) เพราะหาค่าของ J_s ทำให้ E_m ขึ้นกับสมบัติของสารกึ่งตัวนำ เช่น τ , D และระดับการได้ป ค่าประสิทธิภาพในเชิงอุดมคติซึ่งได้จากการเลือกชนิดของสารกึ่งตัวนำให้มีสมบัติที่ให้ค่าของ J_s ต่ำ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าของ E_m แสดงได้ดั่งกราฟเส้นที่ 2 ในรูป 4.5 ซึ่งค่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเชิงอุดมคติจะเท่ากับอัตราส่วนของกำลังสูงสุดที่ส่งออกมาต่อกำลังที่ได้รับเข้าไป, P_m ซึ่งจากรูปที่ 4.5 นั้น จะได้ว่า

$$\eta = P_m / P_m = I_L(E_m/q) / P_m = [V_m^2 I_s(q/kt) e^{qV_m/kt}] / P_m \quad (4.11)$$

หรือ

$$\eta = \text{พื้นที่สี่เหลี่ยมของ } E_m n_{ph} / \text{พื้นที่ใต้กราฟเส้นที่ 1}$$

และเนื่องจากค่าประสิทธิภาพจะมีผลมาจากชนิดและสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งพบว่าสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมสำหรับการจะนำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ควรจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) อยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 2 eV ซึ่งสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ซึ่งมีค่า E_g ประมาณ 1.0 eV ก็เหมาะสำหรับนำมาเป็นโครงสร้างหลักในเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาทำการวิจัยนี้



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนโฟตอนในสเปกตรัมสุริยะ กับพลังงานโฟตอน

ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า 3.4.9.13.15

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบพี-เอ็น เมื่อมีแสงชนิดเอกนรงค์ที่มีความยาวคลื่น λ มาตกกระทบที่ผิวหน้า อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอน ที่ระยะ x จากผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ สามารถเขียนได้เป็น

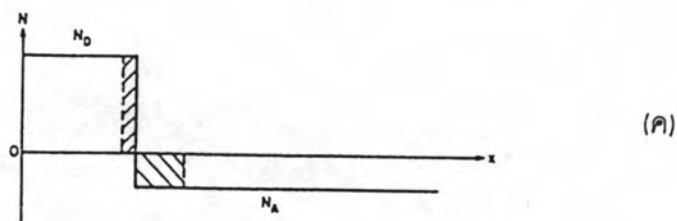
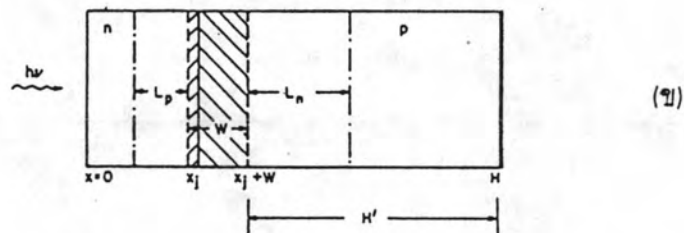
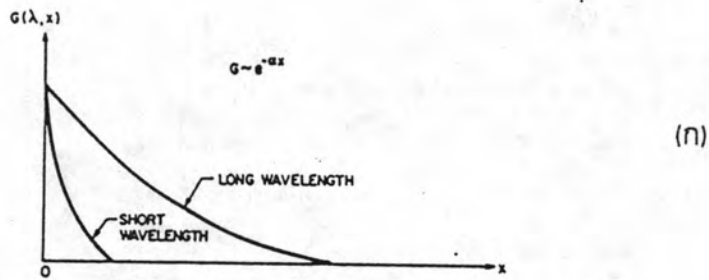
$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda) F(\lambda) [1 - R(\lambda)] e^{-\alpha\lambda x} \quad (4.12)$$

เมื่อ α(λ) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน, F(λ) คือ จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ต่อหน่วยความกว้างย่าน (bandwidth) และ R(λ) เป็นส่วนของโฟตอนที่สะท้อนออกมาจากผิว

การเกิดหุมุพาหะในเซลล์อจาวิเคราะห์โดยใช้สมการความต่อเนื่อง (continuity equation) สำหรับพาหะหุมุน้อย โดยมีเงื่อนไขว่าใช้วิธีการประมาณเป็นแบบจำลองมิติเดียว มีระดับการฉีดพาหะต่ำ (low carrier injection level) ซึ่งหมายถึงค่าความหนาแน่นของพาหะที่

ถูกจัดน้อยกว่าค่าความหนาแน่นของพาหะหมู่มากที่สมดุลย์ และไม่มีสนามไฟฟ้านอกขอบเขตของการพ้องจากสมการ (4.12) ความเข้มข้นของพาหะหมู่ที่เพิ่มขึ้นในบริเวณขอบเขตต่างๆของสารกึ่งตัวนำ ในรูปที่ 4.6 จะคำนวณได้โดยการแก้สมการความต่อเนื่องและสมการความหนาแน่นกระแส ซึ่งจะได้ว่า

$$G_n - (n_p - n_{p0})/\tau_n + (1/q)(dJ_n/dx) = 0 \tag{4.13}$$



รูปที่ 4.6 (ก) อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำสำหรับความยาวคลื่นแสงสั้นและยาว (ข) มิติของเซลล์และความยาวแห่งการแพร่ของพาหะกลุ่มน้อย (ค) โปรไฟล์การโด๊ปของเซลล์

และ

$$J_n = q\mu_n n_p \mathcal{E} + qD_n (dn_p/dx) \quad (4.14)$$

และสำหรับกรณีของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำแบบชนิดพี

$$G_p - (p_n - p_{no})/\tau_p - (1/q)(dJ_p/dx) = 0 \quad (4.15)$$

และ

$$J_p = q\mu_p p_n \mathcal{E} - qD_p (dp_n/dx) \quad (4.16)$$

เมื่อ \mathcal{E} เป็นสนามไฟฟ้า, D_p เป็นสัมประสิทธิ์แห่งการแพร่ของโฮล, q เป็นค่าประจุอิเล็กตรอน p_n เป็นความหนาแน่นโฮลที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง x , n_p เป็นความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง x , μ เป็นค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ และ τ เป็นชั่วชีวิตของสารหมุน้อย สำหรับเซลล์มีรอยต่อแบบชนิดเอ็นบนพี โดยมีเอ็นอยู่ด้านหน้ารับแสง และพีเป็นฐาน (Base) ด้านล่าง ถ้ารวมสมการข้างต้นเข้าด้วยกัน จะแสดงลักษณะเหนือบริเวณรอยต่อ ดังนี้

$$D_p (d^2 p_n / dx^2) + \alpha F (1 - R) \exp(-\alpha x) - (p_n - p_{no}) / \tau_p = 0 \quad (4.17)$$

ผลลัพธ์ของสมการนี้ คือ

$$p_n - p_{no} = A \cosh(x/L_p) + B \sinh(x/L_p) - \frac{\alpha F(1-R)\tau_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \exp(-\alpha x) \quad (4.18)$$

โดย $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$ เป็นค่าความยาวแห่งการแพร่ โดยมีเงื่อนไขของขอบเขต 2 ข้อ คือ

1. ที่ผิวหน้า มีรีคอมบิเนชันที่ผิวหน้าด้วยความเร็วรีคอมบิเนชัน S_p :

$$D_p [d(p_n - p_{no})/dx] = S_p (p_n - p_{no}) \quad \text{ที่ } x = 0 \quad (4.19)$$

2. ที่ขอบชั้นของการพ่อง (depletion edge) ความหนาแน่นของพาหะที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยมาก เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่บริเวณการพ่อง

$$p_n - p_{no} \sim 0 \quad \text{ที่} \quad x = x_i \quad (4.20)$$

ใช้เงื่อนไขของขอบเขตนี้กับสมการ (4.18) ได้ความหนาแน่นของโฮลเป็น

$$p_n - p_{no} = [\alpha F (1 - R) \tau_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)] \\ \times \left[\frac{(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p) \sinh(\frac{x_j - x}{L_p}) + e^{-\alpha x_j} (\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh \frac{x}{L_p} + \cosh \frac{x}{L_p})}{(S_p L_p / D_p) \sinh(x_j / L_p) + \cosh(x_j / L_p)} - e^{-\alpha x} \right] \quad (4.21)$$

และผลลัพธ์ค่าความหนาแน่นกระแสจากแสง (photocurrent density) ของโฮลเป็น

$$J_p = -q D_p (dp_n / dx)_{x_i} = [q F (1 - R) \alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)] \\ \times \left[\frac{(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p) - e^{-\alpha x_j} (\frac{S_p L_p}{D_p} \cosh \frac{x_j}{L_p} + \sinh \frac{x_j}{L_p})}{(S_p L_p / D_p) \sin(x_j / L_p) + \cosh(x_j / L_p)} - \alpha L_p e^{-\alpha x_j} \right] \quad (4.22)$$

กระแสส่วนนี้ได้จากบริเวณชั้นด้านหน้าของเซลล์ที่ความยาวคลื่นอันหนึ่ง โดยสมมุติว่าบริเวณนี้มีชีวิตสภาพเคลื่อนที่ได้และระดับการโด๊ปสม่ำเสมอ การหากระแสจากแสงของอิเล็กตรอนที่ได้จากฐานของเซลล์ให้ใช้สมการ (4.12), (4.13), และ (4.14) พร้อมกับเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

$$n_p - n_{po} \sim 0 \quad \text{ที่} \quad x = x_i + W \quad (4.23)$$

$$\text{Sn}(n_p - n_{po}) = -D_n (dn_p / dx) \quad \text{ที่} \quad x = H \quad (4.24)$$

โดย W เป็นความกว้างของชั้นการพ่องและ H เป็นความกว้างทั้งหมดของเซลล์ สมการ (4.23) แสดงว่าความหนาแน่นของพาหะหมุนุน้อยที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยที่ขอบบริเวณการพ่อง ส่วนสมการ (4.24) แสดงถึงการรีคอมบิเนชันที่ผิวด้านหลังเกิดที่ผิวสัมผัสโอมมิค (ohmic contact) ถ้าใช้เงื่อนไขขอบเขตนี้ จะได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในฐานะที่เป็นสารแบบชนิดพี ซึ่งมี การโด๊ปสม่ำเสมอเป็น

$$n_p - n_{\infty} = \frac{\alpha F(1-R)\tau_n}{\alpha^2 L^2 - 1} \exp[-\alpha(x_1 + W)] \left\{ \cosh\left(\frac{x-x_j-W}{L_n}\right) - e^{-[\alpha(x-x_j-W)]} \right. \\ \left. - \frac{(S_n L_n / D_n)[\cosh(H'/L_n) - \exp(-\alpha H')] + \sinh(H'/L_n) + \alpha L_n e^{-\alpha H'}}{(S_n L_n / D_n)\sinh(H'/L_n) + \cosh(H'/L_n)} \times \sinh\left(\frac{x-x_j-W}{L_n}\right) \right\} \quad (4.25)$$

ความหนาแน่นกระแสจากแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ได้จากขอบการพ่องที่ระยะ $x = x_1 + w$ เป็น

$$J_n = qD_n \left(\frac{dn_p}{dx} \right)_{x_1+w} = \frac{qF(1-R)\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \exp[-\alpha(x_1 + W)] \times \left\{ \alpha L_n \right. \\ \left. - \frac{(S_n L_n / D_n)[\cosh(H'/L_n) - \exp(-\alpha H')] + \sinh(H'/L_n) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{(S_n L_n / D_n)\sinh(H'/L_n) + \cosh(H'/L_n)} \right\} \quad (4.26)$$

โดยที่ H' เป็นบริเวณที่เป็นกลางในฐานพี สมการ (4.26) สามารถหาได้จากการสมมุติว่าค่าชั่วชีวิต สภาพเคลื่อนที่ได้และระดับการโคปที่สม่ำเสมอภายในบริเวณชั้นของการพ่อง ก็สามารถเกิดกระแสจากแสงได้ สนามไฟฟ้าในบริเวณนี้สูงพอที่จะเร่งพาหะที่เกิดขึ้นให้ออกไปพ้นบริเวณการพ่องก่อนที่จะรวมตัวกันใหม่ กระแสจากแสงต่อหนึ่งหน่วยความกว้างแถบจะเท่ากับจำนวนของโฟตอนที่ถูกดูดกลืน

$$J_{dr} = qF(1-R) \exp(-\alpha x_1) [1 - \exp(-\alpha W)] \quad (4.27)$$

กระแสจากแสงทั้งหมดที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่งคือผลรวมของสมการ (4.22), (4.26) และ (4.27)

$$J(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda) \quad (4.28)$$

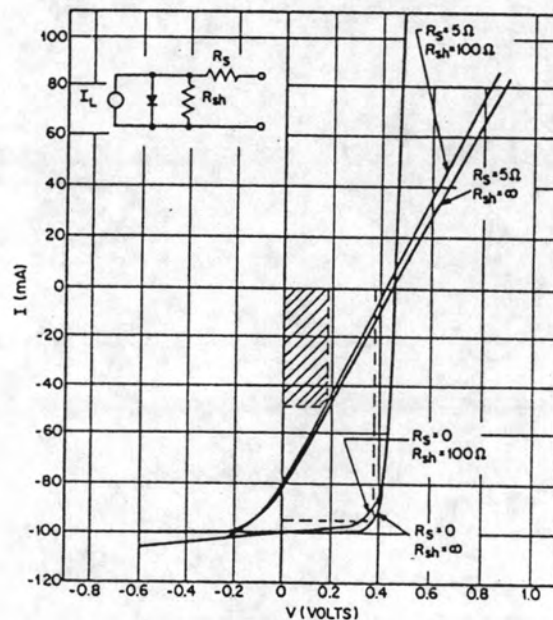
ลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์กระแส-ความต่างศักย์^{9,15,16}

ในเซลล์สุริยะที่ใช้งานจริงนั้นยังมีการสูญเสียกำลังงานส่วนหนึ่ง เนื่องจากผลของความต้านทานอนุกรมและขนานที่เกิดจากตัวเซลล์เอง ความต้านทานอนุกรมในเซลล์เกิดที่บริเวณผิวสัมผัสเนื่องจากสภาพต้านทานในเนื้อสาร ความต้านทานสัมผัส (contact resistance) และความต้านทานของชั้นแห่งการแพร่ ตัวหลังสุดนี้เป็นตัวแปรสำคัญต่อความต้านทานอนุกรม

ส่วนความต้านทานขนานพิจารณาจากการรั่วที่ผิวหน้า ตามขอบเซลล์และผลของโลหะที่แปะบนผิวหน้าเซลล์ ความต้านทานขนานมักไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์ถ้าไม่น้อยจนเกินไป ดังนั้นถ้าคิดผลกระทบของความต้านทานอนุกรมด้วย ความสัมพันธ์กระแส-ความต่างศักย์ จะเขียนได้เป็น

$$\ln\left(\frac{I+I_L}{I_S} - \frac{V-IR_S}{I_S R_{sh}} + 1\right) = \frac{q}{kT} (V - IR_S) \quad (4.29)$$

และวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบของความต้านทานต่อลักษณะเฉพาะ I-V และวงจรสมมูล

ซึ่งถ้าไม่คำนึงถึงผลของความต้านทานขนาน ค่าของกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ได้จะสามารถเขียนได้เป็น

$$I = I_S \exp\left\{\left[\frac{q(V-IR_S)}{kT}\right] - 1\right\} - I_L \quad (4.30)$$

$$P = |IV| = I \left[\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I+I_L}{I_s} + 1 \right) + IR_S \right] \quad (4.31)$$

ความต้านทานแบบอนุกรมที่เกิดขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับความลึกของรอยต่อ (junction depth) , ความเข้มข้นของสิ่งเจือ (impurity concentrations) ของบริเวณทั้งด้านพีและเอ็น และการจัดเรียงตัวของผิวรอยต่อโอมมิคที่ด้านหน้า จากกราฟที่ได้ทำให้สามารถนิยามค่าฟิลแฟคเตอร์ (fill factor), FF และอัตราการผลิตพลังงานได้ว่า

$$FF = I_m V_m / I_L V_{oc} \quad (4.33)$$

และ

$$\eta = I_m V_m / P_{in} = FF \cdot I_L V_{oc} / P_{in} \quad (4.34)$$

ในรูปที่ 4.7 นั้น จะเห็นผลกระทบที่ความต้านทานอนุกรมมีต่อเส้นโค้ง I - V อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีผลต่อค่าฟิลแฟคเตอร์ การแก้ปัญหาเพื่อลดความต้านทานอนุกรม โดยการเพิ่มจำนวนกิ่งก้าน บางครั้งเรียกว่า "นิ้วมือ" ของกริดสัมผัส แต่การทำเช่นนี้จะไปลดพื้นที่รับแสงของเซลล์ ปกติมักใส่กริดสัมผัสที่พื้นที่ประมาณ 5 - 10 เปอร์เซ็นต์ของผิวหน้าเซลล์ และมีความต้านทานในช่วงระหว่าง 0 - 1 Ω กับ 0 - 2 Ω สำหรับกริดสัมผัส 6 กิ่ง ความต้านทานอนุกรมในเซลล์มีผลกระทบโดยจะไปลดประสิทธิภาพของเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงลง

เซลล์แบบรอยต่ออวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cells) ^{9,13,15}

รอยต่ออวิวิธพันธุ์เป็นรอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างสารกึ่งตัวนำ 2 ตัวที่มีช่องว่างแถบพลังงานต่างกัน แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แบบรอยต่ออวิวิธพันธุ์แบบชนิดเอ็นบนพี แสดงในรูปที่ 4.8

ให้เซลล์มีประสิทธิภาพลดลง

- 3 มีความต้านทานอนุกรมต่ำกว่า ถ้าหากสารกึ่งตัวนำตัวแรกนี้ได้รับการโอบอย่างหนาแน่น โดยไม่กระทบต่อสมบัติในการให้แสงผ่านตัวมัน
- 4 ทนทานต่อรังสีแรงๆ ได้ดี ถ้าหากใช้สารกึ่งตัวนำตัวแรกมีขนาดค่อนข้างหนารวมทั้งมีช่องว่างแถบกว้างอีกด้วย

การแสดงค่ากระแสจากแสงในเซลล์แบบรอยต่อวิวิธพันธุ์คล้ายกับที่เคยใช้ในแบบรอยต่อเอกพันธุ์ กล่าวคือ สำหรับเซลล์แบบรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบชนิดเอ็นบนพี ความหนาแน่นกระแสจากแสงของหลุม, J_p เหมือนกับสมการ (4.22) เว้นแต่แทน α ด้วย α_1 และแทน L_p ด้วย L_{p1} โดย α_1 และ L_{p1} เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและความยาวแห่งการแพร่ในสารกึ่งตัวนำตัวแรกตามลำดับ ความหนาแน่นกระแสจากแสงสำหรับอิเล็กตรอน J_n เหมือนสมการ (4.26) เช่นเดียวกันต้องแทน α ด้วย α_2 , แทน L_n ด้วย L_{n2} และแทน $(x_1 + W)$ ด้วย $[\alpha_1 (x_1 + W_1) + \alpha_2 W_2]$ โดย α_2 และ L_{n2} เป็นค่าที่ใช้กับสารกึ่งตัวนำตัวที่สอง W_1 และ W_2 เป็นความกว้างของชั้นการพ่องในสารกึ่งตัวนำทั้งสองกระแสจากแสงที่ได้จากบริเวณการพ่องได้เป็น

$$J_{dr} = qF(1-R) \left[e^{-\alpha_1 x_j} (1 - e^{-\alpha_1 W_1}) + e^{-\alpha_1 (W_1 + x_j)} (1 - e^{-\alpha_2 W_2}) \right] \quad (4.35)$$

โดยสมการข้างบนนี้ถือว่า

1. แถบการนำที่เหลื่อมกัน ΔE_c น้อย (ในกรณีรอยต่อวิวิธพันธุ์พีบนเอ็น ΔE_v น้อย) ดังนั้น พาหะหมู่ย่อยในสารกึ่งตัวนำตัวที่สองจะไม่ถูกกีดขวางการไหลข้ามรอยต่อ
2. รอยต่อวิวิธพันธุ์จะต้องมีการเข้าคู่กันของผลึกที่เหมาะสมอย่างดีด้วย จึงจะตัดปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ ระหว่างผิวรอยต่อ (interface trap) ซึ่งลดค่าชีวิตภายใน และรอบๆบริเวณการพ่อง

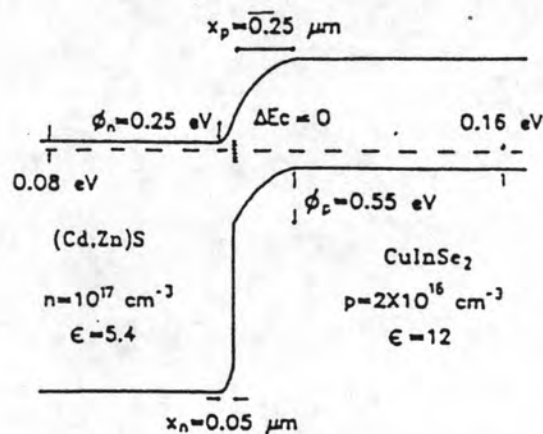
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (thin film solar cells) ^{9,15,18}

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางประกอบด้วยชั้นสารกึ่งตัวนำ เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS), ซิลิคอน (Si), แกลเลียมอาเซนายด์ (GaAs) อินเดียมฟอสไฟด์ (InP), และ

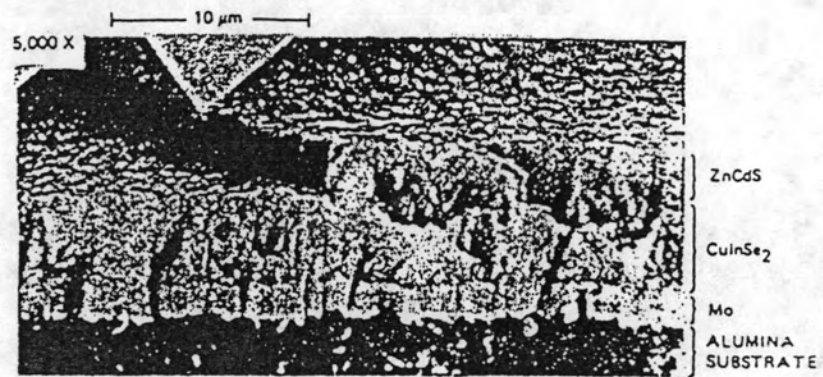
คอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInSe_2) ที่ก่อดับนับเตรท ซึ่งอาจจะเป็นแก้วพลาสติก , กระจกเคลือบ โลหะ หรือกราฟไฟต์เป็นต้น การก่อดับนับเตรทมีหลายวิธี เช่น เวเปอร์โกรท (vapor growth) การระเหยโดยพลาสมา (evaporation plasma) หรือการชุบ (plating) ปกติถ้าสารกึ่งตัวนำมีความหนาแน่นมากกว่าส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การดูดกลืน มันจะดูดกลืนแสงได้มาก ถ้าความยาวแห่งการแพร่ยาวกว่าความหนาของฟิล์ม พานะเกือบทั้งหมดที่เกิดขึ้น จะถูกรวบรวมไว้

ข้อดีของเซลล์ชนิดฟิล์มบางคือ ราคาต่ำ เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ยาก วัสดุก็มีราคาถูก ส่วนข้อเสียคือ ให้ประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากผลจากขอบเขตของเกรน (grain boundary) และส่วนหนึ่งจากวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ก่อดับนับเตรทมีคุณภาพไม่ดีพอ นอกจากนี้ มีปัญหาเกี่ยวกับเซลล์ไม่เสถียรในระยะยาวสาเหตุเพราะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง สารกึ่งตัวนำกับสภาพโดยรอบเช่น ออกซิเจน ไอน้ำ

$\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ ก็เป็นเซลล์ชนิดฟิล์มบางแบบรอยต่อวิวิธพันธุ์อีกตัวหนึ่งอยู่ในขั้นพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูง และยังมีสารประกอบไตรภาค (ternary compound) อีกหลายตัวที่น่าสนใจสำหรับเซลล์ราคาต่ำ เช่น กลุ่มสารกึ่งตัวนำระหว่างกลุ่ม I-III-V₂ และ II-IV-V₂ เนื่องจากสารในกลุ่มนี้มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการนำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์^{2,22,23}



รูปที่ 4.9 แผนภาพแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ CuInSe_2 -CdS แบบฟิล์มบาง



รูปที่ 4.10 ภาพขยายภาคตัดขวางของรอยต่อระหว่าง $\text{CuInSe}_2 / (\text{Cd,Zn})\text{S}$
ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง³